

В. И. Борисенко¹, А. Ф. Волох², В. В. Горанчук¹, Н. М. Сидорук^{1,2}

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

² *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДКРИТИЧНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Рассмотрены вопросы определения подкритичности ядерного реактора. Подчеркнуто, что, несмотря на требования нормативных документов по определению подкритичности ВВЭР с начала их эксплуатации, до настоящего времени такая задача не решена. Представлены результаты определения степени подкритичности реактора ВВР-М методом Росси- α . Рассмотрена возможность определения подкритичности ВВЭР, а также рассмотрена возможность определения подкритичности методом Росси- α с разрешением по времени порядка 100 мкс. Указаны возможные причины погрешности определения подкритичности реактора.

Ключевые слова: подкритичность, реактивность, статистические методы, метод Росси- α , исследовательский реактор, энергетический реактор.

В соответствии с НТД [1], введенными в действие в Украине в 2008 г., на водо-водяных энергетических реакторах должен быть реализован контроль подкритичности активной зоны ядерного реактора. Проектирование и эксплуатация ВВЭР АЭС Украины до 2008 г. проводились в соответствии с требованиями нормативных документов [2, 3], в которых также требовалось, чтобы в техническом проекте ВВЭР были предусмотрены технические средства и методики контроля подкритичности активной зоны.

Дополнительно при подготовке к пуску блоков на ХАЭС-2 и РАЭС-4 в 2004 г. была разработана программа [4], в которой одним из мероприятий по повышению безопасности новых энергоблоков было требование: «Обеспечить энергоблок техническими средствами контроля подкритичности активной зоны реактора». И еще ранее в докладе МАГАТЭ [5] было рекомендовано признать в качестве первоочередной задачи обеспечение энергоблоков ВВЭР техническими средствами контроля подкритичности активной зоны реактора.

Таким образом, от начала эксплуатации энергоблоков с ВВЭР и до настоящего времени не реализовано одно из требований нормативных документов по определению подкритичности активной зоны ядерного реактора. Необходимо также отметить, что, несмотря на большое количество работ по определению подкритичности исследовательских реакторов и сборок, до настоящего времени нет апробированных научно-технических решений по определению подкритичности активной зоны энергетического реактора.

Сегодня контроль за подкритичностью ВВЭР осуществляется косвенными методами на основе измерения величины нейтронного потока, положения органов регулирования системы управле-

ния и защиты (ОР СУЗ) и концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура реактора [6]. При расчете нейтронно-физических характеристик активной зоны ядерного реактора очередной топливной загрузки определяется концентрация борной кислоты, обеспечивающая требуемые уровни подкритичности для разных режимов останова реактора. Однако такой расчетный метод не может определить реальную подкритичность активной зоны ядерного реактора при возможных непроектных конфигурациях и составе ОР СУЗ, а также при изменении температуры теплоносителя, при которой может произойти «захолаживание» остановленного реактора и возможный неконтролируемый выход ядерного реактора в «повторную» критичность [7].

Для определения подкритичности РБМК и, в частности, бассейнов выдержки (БВ) применяются более современные методы и средства [8, 9]. Так, например, в работе [8] представлены результаты определения подкритичности БВ РБМК на основе измерения постоянной спада мгновенных нейтронов с использованием импульсного нейтронного генератора (ИНГ). Однако несмотря на высокую чувствительность и помехозащищенность данного метода у него есть и существенные недостатки, связанные с высокой трудоемкостью проводимых измерений и высокой стоимостью ИНГ.

Наиболее широкий обзор работ по определению подкритичности ядерного реактора представлен в работах [10, 11]. Решение задачи определения подкритичности ядерного реактора может быть реализовано на основе применения традиционных методов определения подкритичности реактора, основанных на макроскопических [10] и/или микроскопических [11] закономерностях поведения нейтронов в подкритическом реакторе.

Модель динамического поведения нейтронов в подкритическом реакторе основана на известном законе обратного умножения мощности внешнего источника нейтронов S в реакторе, в соответствии с которым нейтронный поток в подкритическом реакторе пропорционален S и обратно пропорционален степени подкритичности реактора.

К микроскопическим или статистическим моделям поведения нейтронов в подкритическом реакторе относятся [10]: метод Росси- α ; метод Фейнмана; метод нулевой вероятности; метод распределения интервалов; метод импульсного источника нейтронов.

На практике применение указанных статистических методов требует высокоточных характеристик регистрирующей аппаратуры с временным разрешением порядка 1 мкс [10] и для измерений традиционно использовались дорогостоящие временные анализаторы. В последнее время широкое применение в практике проведения исследований получили высокочастотные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), а также специализированные микропроцессоры с функцией точного измерения времени между импульсами, применение которых делает проведение статистических исследований более доступными, в том числе и на энергетических реакторах [8]. Однако в условиях энергетического реактора в высоких полях электромагнитного излучения от работающего оборудования трудно добиться высокой помехозащищенности для обеспечения высокого временного разрешения порядка 1 мкс, поэтому в работе исследована возможность применения метода Росси- α при «худшем» временном разрешении порядка $10 \div 100$ мкс и с использованием АЦП и РС (рис. 1) вместо «традиционных» временных анализаторов.

Метод Росси- α

Метод Росси- α [12, 13] был первым экспериментальным методом, применяемым для статистических исследований реакторных систем. Метод разработан Росси на основе предположения, что акты деления в реакторной системе являются случайными процессами за счет временной корреляции между нейтронами одной цепочки деления, имеющими общего предшественника – «пускового» нейтрона. Суть метода Росси- α состоит в измерении условной вероятности $p(t)$ регистрации нейтрона в интервале времени Δ через время t после регистрации «пускового» нейтрона в момент времени t_0 .

Несмотря на то, что метод Росси- α первоначально был разработан для реакторов на быст-

рых нейтронах (РБН), модификации этого метода позволяют его также использовать для реакторных систем на тепловых и промежуточных нейтронах, в которых имеет место перекрытие цепочек деления и среднее время жизни цепочек больше по сравнению с РБН.

Если принять, что количество мгновенных нейтронов n_p в подкритическом реакторе определяется в соответствии с формулой [10]

$$n_p = \frac{S \cdot \ell}{1 - k_p} = \frac{S}{\alpha}, \quad (1)$$

где S – мощность нейтронного источника; $k_p = k(1 - \beta)$; k – коэффициент размножения нейтронов; β – эффективная доля запаздывающих нейтронов; ℓ – время жизни мгновенных нейтронов, соответственно

$$\alpha = \frac{1 - k_p}{\ell} = \frac{\beta - \rho}{\Lambda}, \quad (2)$$

где $\Lambda = \frac{\ell}{k}$ – время генерации нейтронов, то константа Росси- α , определяемая по формуле (2), является константой спада мгновенных нейтронов и относится к важным параметрам, характеризующим динамические свойства подкритических систем, а также околокритических реакторов с нулевой мощностью.

Выражение для α также можно получить из уравнений кинетики точечного реактора [10]:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_i \lambda_i c_i + S, \\ \frac{dc_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i c_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где n – количество нейтронов в реакторе; c_i – количество ядер-предшественников i -й группы запаздывающих нейтронов; β_i – эффективная доля ядер-предшественников i -ой группы запаздывающих нейтронов; λ_i – постоянная распада ядер-предшественников i -й группы запаздывающих нейтронов.

Для длительного стационарного состояния реактора в подкритическом состоянии можно пренебречь влиянием запаздывающих нейтронов и внешним источником нейтронов S , в этом случае из формулы (3) получаем

$$\alpha \equiv - \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{\beta - \rho}{\Lambda}.$$

В подкритическом реакторе число мгновенных нейтронов, а соответственно и общее число

нейтронных цепочек обратно пропорционально α для данной мощности нейтронного источника S . Поэтому в подкритическом реакторе при слабом нейтронном источнике S большинство нейтронов будут членами единичной нейтронной цепочки, начавшейся с одного мгновенного нейтрона источника S .

Подробное описание метода Росси- α представлено в работах [10, 11].

Несмотря на некоторые аппаратные сложности применения метода Росси- α для систем на тепловых нейтронах, оказалось, что можно получить правильное значение α при правильном выборе параметров экспоненциального участка зависимости $p(t)$ [14, 15].

Для проведения измерений на энергетическом ядерном реакторе необходимы специальные электронные преобразователи для согласования сигнала нейтронного детектора с регистрирующей аппаратурой. На ВВЭР в системах нейтронного контроля применяются ионизационные камеры (ИК) типа КНК-4, КНК-56, КНК-15, счетчики нейтронов СНМ-18, а также родиевые датчики прямого заряда (ДПЗ). В АКНП-ИФ производства Северодонецкого научно-производственного объединения «Импульс» применяются ИК «Fotonis» (Франция).

Для проведения измерений на ВВР-М был специально разработан импульсный измерительный канал с детектором нейтронов СНМ-18, который обеспечивал увеличение динамического диапазона работы детектора на три декады по сравнению с токовыми камерами КНК-4, КНК-56, применяемыми в штатных системах контроля ВВЭР. Выбор СНМ-18 в качестве детектора

нейтронов импульсного измерительного канала объясняется тем, что СНМ-18 уже долгое время применяются в системе контроля перегрузки (СКП) реактора как «старого» АКНП-07, так и нового поколения АКНП-И, АКНП-ИФ, а также СНМ-18 обладает высокой «нейтронной» чувствительностью. Поэтому результаты исследований на исследовательском реакторе могут быть в короткие сроки адаптированы для измерений на энергетическом реакторе.

Функциональная схема импульсного канала представлена на рис. 1. Импульсы от счетчика через линию связи поступают на входной импульсный усилитель, первая секция которого работает по принципу зарядочувствительного усилителя, вторая – дифференцирующего усилителя. Использование на входе канала зарядочувствительного усилителя обеспечивает компенсацию емкости кабеля, соединяющего детектор с усилителем, и позволяет выносить входной усилитель за пределы зоны облучения. Такое расположение усилителя облегчает обслуживание и повышает его надежность. Импульсы входного усилителя, продифференцированные и усиленные, через линию связи подаются на АЦП и вводятся в ЭВМ для записи и обработки.



Рис. 1. Функциональная схема импульсного канала.

Таблица 1. Состояния ядерного реактора

Состояние	Описание	Средняя скорость счета СНМ-18, имп/с
П1.	Все стержни регулирования и стержни АЗ внизу	365
П2.	Стержни 1АЗ, 2АЗ и 3АЗ вверху	610
П3.	Стержни 1АЗ, 2АЗ, 3АЗ, АР (50 %), 1РР вверху	2809
П4.	Стержни 1АЗ, 2АЗ, 3АЗ, АР (50 %), 1РР и 2РР (35 см) вверху	8179

Выбор порога дискриминации программным образом позволяет отсеять импульсную составляющую γ -фона, шумы и импульсные помехи, амплитуда которых меньше порога дискриминации. Измерения, представленные в статье, проводились после формирования «новой» топливной загрузки ВВР-М, который продолжительное время не работал, поэтому в подкритических состояниях реактора были относительно низкие потоки нейтронов (табл. 1) и γ -квантов, что необходимо учитывать при проведении исследований при более низких отношениях сигнал/фон.

Во время проведения измерений для удобства выбора уровня дискриминации на экран выводятся временная реализация входного сигнала. Величина импульсов от регистрации нейтронов в несколько раз выше, чем от γ -квантов. Таким образом, выбирая уровень дискриминации таким, чтобы над порогом были преимущественно импульсы от регистрации нейтронов, удается практически исключить влияние γ -излучения на измеряемую счетность нейтронов.

Блок питания выполнен в виде отдельного блока. В фильтрах блока питания использованы

среднее время между нейтронными отсчетами;

3) различная длительность временной выборки, на которой проводится подсчет нейтронных отсчетов, попавших в заданный временной интервал, после «пускового» нейтрона – 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 3,0 мс;

4) определение экспоненты методом наименьших квадратов для исходно полученной зависимости, а также для зависимости, полученной путем «усреднения» полученных значений между соседними измерениями;

5) расчеты проводились для разных временных отрезков длительностью 5, 10, 20, 50 с, выбираемых на всей длительности записи измерения для соответствующего состояния реактора П1, П2, П3 и П4;

6) полученные при одинаковых условиях, но на разных временных отрезках п. 5 показатели экспоненты для каждого из состояний реактора «сглаживались» методами – арифметическое среднее и «медиана», а также выбирались наибольшие и наименьшие значения.

Таблица 2. Значения α для различных состояний реактора в зависимости от длины временной выборки, на которой определяется α

Состояние реактора	Длина временной выборки, с						
	0,0008	0,0010	0,0012	0,0014	0,0016	0,0018	0,0020
П1	2565	2818	2980	3144	3200	2782	2385
П2	2535	2281	2584	2447	2281	2078	1896
П3	1788	1631	1457	1291	1119	979	863
П4	823	697	598	518	466	426	400

В табл. 2 представлены определенные в одной из «комбинаций» условий п. 1 - 5 значения α , соответствующие наибольшей подкритичности, которые в наибольшей степени соответствуют расчетным значениям подкритичности реактора и измеренным с помощью реактиметра (табл. 3).

Таблица 3. Расчетные и измеренные значения подкритичности ВВР-М

Состояние	Подкритичность, в долях β			
	расчетная	измеренная реактиметром	измеренная со «сглаживанием»	
			без	по 2 точкам
П1	28,8	25,88	25,5	17,6
П2	16,2	16,03	17,9	12,5
П3	9,1	8,88	7,9	4,3
П4	6,4	6,1	2,6	0,0

Проведение таких расчетных исследований позволяют определить применимость предлагаемой методики определения α на относительно «малом» числе точек для определения постоянной спада мгновенных нейтронов α . При проведении «классического» Росси- α исследования подкритичности реактора с разрешением по времени 1 мкс на экспоненциальный участок приходится ~ 100 точек, и «вопрос» выбора длины временного участка, на котором проводится экспонента, несущественен. В нашем исследовании с разрешением по времени 100 мкс на экспоненциальный участок приходится всего 5 - 10 точек, поэтому принципиальным является вопрос опре-

деления минимально допустимой длины временного участка, на котором проводится экспонента.

В процессе исследований были определены наиболее оптимальные параметры расчетной модели – уровень дискриминации входного сигнала, время выборки и параметры усреднения. Наилучшее соответствие с теоретическими расчетными результатами получено для: уровня дискриминации +0,02 В; времени выборки, на которой определяется экспонента, от 0,0002 до 0,001 с; усреднения по двум соседним точкам.

Разброс значений α при использовании прямых результатов измерений при изменении условий определения «пускового» нейтрона составляет ~ 10 %, при одинаковой длине временной выборки. А разброс значений α при использовании «сглаженных» по двум соседним точкам результатов исследований при тех же условиях составляет ~ 5 %.

Результаты обработки по методу со «сглаживанием» по соседним точкам дают наименьшие, по абсолютной величине, значения по подкритичности реактора для различных состояний, а значит, более консервативные результаты с точки зрения обеспечения ядерной безопасности.

В состоянии П4 было достигнуто критическое состояние ядерного реактора, для которого была проведена обработка данных по методу Росси- α со «сглаживанием» по соседним точкам и определено значение отношения $\beta/\ell \approx 133 \text{ с}^{-1}$, являющееся важным динамическим показателем ядерного реактора.

Для метода без «сглаживания» отношения $\beta/\ell \approx 250 \text{ с}^{-1}$, что существенно влияет на величину времени жизни мгновенных нейтронов и со-

ответственно определенную подкритичность по методу Росси-а.

Учитывая, что для уранового топлива $\beta = 0,0064$, соответственно $\ell = 4,8 \cdot 10^{-5}$ с, которое и было использовано для вычислений степени подкритичности ядерного реактора в соответствии с формулой (4). Необходимо учитывать, что при увеличении степени подкритичности, увеличивается и время жизни мгновенных нейтронов, так как $\ell \sim \frac{1}{\Sigma_a}$, где Σ_a - макросечение

поглощения нейтронов в активной зоне.

В табл. 3 представлены результаты определения параметра α для оптимальных параметров расчетной модели по методу Росси-а.

Несмотря на лучшее согласие результатов определения подкритичности по методу без «сглаживания» с расчетными данными и данными измерений с помощью реактиметра авторы обращают внимание на более консервативные результаты определения подкритичности по методу Росси-а со «сглаживанием», в котором для состояния с критичностью реактора П4 было определено отношение $\beta/\ell \approx 133 \text{ с}^{-1}$. Более обоснованный выбор может быть сделан, если известно расчетное время жизни мгновенных нейтронов.

Также на результаты измерений оказывает влияние интерференция стержней регулирования при различном их положении при измерении реактивности с помощью реактиметра и при измерениях методом Росси-а.

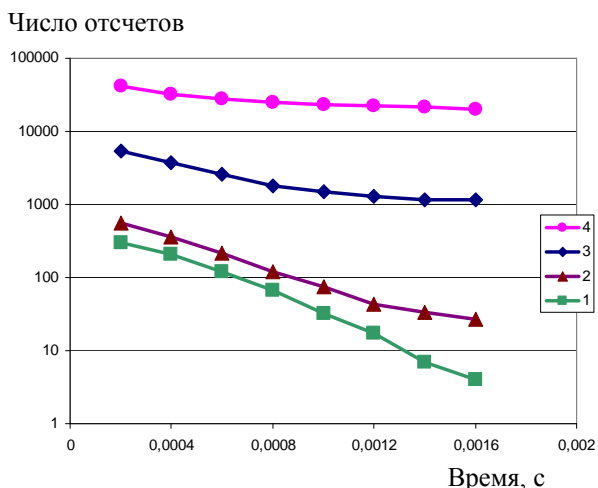


Рис. 3. Распределение временных интервалов между соседними импульсами для состояний: 1 - П1; 2 - П2; 3 - П3; 4 - П4. (См. цветной рис. на сайте журнала.)

Дополнительные факторы, влияющие на точность определения α следующие.

1. Необходимо учитывать изменение времени жизни мгновенных нейтронов для различных по подкритичности состояний реактора.

2. Если нейтронный детектор расположен в

Дополнительно была исследована расчетная модель на устойчивость к длине временной выборки, для которой выполняется расчет. Время измерений для каждого подкритического состояния, которое составляло 50 с, разбивалось на участки длиной 5 - 10 с, и результаты расчетов сравнивались между собой. Было установлено, что длина выборки 5 - 10 с достаточна для получения расчетных значений с точностью, как и на большой выборке.

В ходе исследований подтверждено, что точность определения параметра α зависит от «правильности» выбора экспоненциального участка в зависимости $N = f(\Delta t)$ (рис. 3 и 4), что также отмечено в работе [14]. На рис. 3 «выбранный» экспоненциальный участок простирается от 0,2 до 1 мс, а на рис. 4 для состояния реактора П3 показано распределение количества отсчетов во времени после «пускового» нейтрона. Экспонента, аппроксимированная методом наименьших квадратов, проведена по пяти точкам. Правильность выбора экспоненциального участка особенно важна для глубоких подкритичностей с $k \leq 0,93$. Применение низкой частоты опроса 10 кГц позволяет зафиксировать только «конец» экспоненты, простирающийся до времени 0,001 с, в нашем измерении это 5 - 10 точек, в зависимости от применяемого метода фильтрации входных данных.

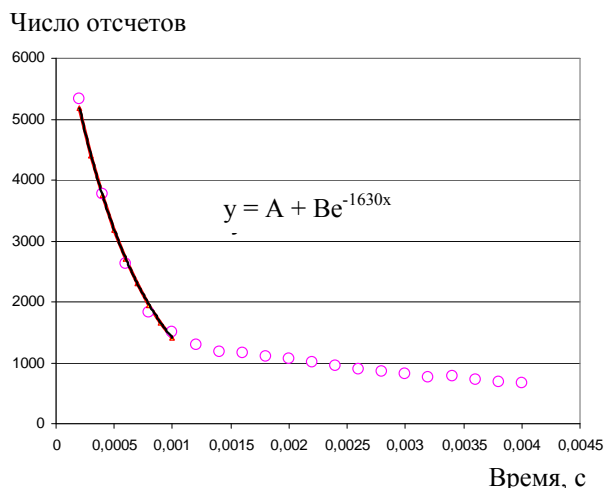


Рис. 4. Распределение временных интервалов с выбранным участком экспоненциальной зависимости для состояния П3 (экспоненциальный участок до 0,001 с).

отражателе, который является дополнительным источником «сторонних нейтронов» (например, в бериллии реакции $(n, 2n)$ или (γ, n)), необходимо учитывать влияние последнего. На такую необходимость указано в [11, 16]. Однако учитывая, что:

а) в этом случае зависимость распределения количества отсчетов от времени будет иметь вид $N(t) = a + be^{-\alpha t} + ce^{-\beta t}$, где N - количество отсчетов; t - время; α - постоянная спада нейтронов в реакторе; β - постоянная спада нейтронов в отражателе; a, b, c - константы, а $\beta > \alpha, b > c$ [11], что, по мнению авторов, позволяет на данном этапе исследований пренебречь влиянием отражателя на «больших» временах от 0,2 до 1 мс, на котором определялась постоянная спада мгновенных нейтронов;

б) рассматриваемая методология определения постоянной спада мгновенных нейтронов предлагается для энергетического реактора, в отражателе которого отсутствуют нейтроны «сторонних источников», поэтому считаем возможным на данном этапе исследований ограничиться учетом только одной экспоненты с показателем α_1 : $N(t) = a + be^{-\alpha_1 t}$. Определенное таким образом значение постоянной спада мгновенных нейтронов в исследовательском реакторе $\alpha_1 > \alpha$, и, следовательно, степень подкритичности завышена.

3. Точность определения α зависит также и от способа подсчета временных интервалов между регистрациями нейтронов одной цепочки [17]. В настоящей работе использовался подсчет всех интервалов между всеми нейтронами, зарегистрированными на выбранном интервале измерения. Возможны также и другие способы, например подсчет временных интервалов только между пусковым нейтроном и последующими нейтронами либо попарно между последующими нейтронами и т.д.

Необходимо также подчеркнуть, что статистические методы развивались в основном для реакторов нулевой мощности, а для энергетических реакторов необходимо апробировать их некоторые модификации. Можно утверждать, что и представленный алгоритм определения подкритичности ядерного реактора методом Росси- α может быть адаптирован для определения подкритичности энергетического реактора типа ВВЭР. Для этого необходимо обеспечить работу измерительных каналов в импульсном режиме с интенсивностью счета порядка 100 Гц.

Однако для глубоких подритических состояний, с высокой концентрацией борной кислоты в теплоносителе 1-го контура (порядка и более стояночной - 16 г/кг), интенсивность счета ИК в штатных измерительных каналах АКНП составляет порядка 10 - 50 Гц. Поэтому для решения задачи определения глубоко подкритических состояний активной зоны энергетического реактора необходимы другие решения, например: применение более высокочувствительных детекторов нейтронов; расположение измерительного канала в каналах выгородки активной зоны и др.

В работе показано, что применение метода Росси- α для определения подкритичности активной зоны ядерного реактора возможно с применением регистрирующей аппаратуры с временным разрешением порядка 100 мкс, что может быть реализовано в условиях энергетического реактора на технических средствах современных АКНП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила* ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением. НП 306.2.145-2008.
2. *Правила* ядерной безопасности атомных электростанций. ПБЯ РУ АС-89. ПНАЭ Г-1-024-90.
3. *Правила* ядерной безопасности атомных электростанций. ПБЯ-04-74. - Госатомнадзор, 1974.
4. *Программа* «О реализации мероприятий по повышению безопасности и модернизации энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС». - НАЭК «Энергоатом», 2004.
5. *Технический отчет* МАГАТЭ. IAEA-EBR-WWER-05 (березень 1996).
6. *Методики* расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках АЭС с реакторами ВВЭР-1000. РДЭО 0151-2004. - ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2005.
7. *Пономаренко Г.Л.* Новый концептуальный подход для определения минимально достаточного количества ОР СУЗ в ВВЭР. МНТК-2011.
8. *Кудрявцев К.Г., Калязин Н.Н., Болотов Д.В. и др.* Контроль за размножающими свойствами хранилища ОЯТ Ленинградской АЭС с использованием комплекса программ САПФИР-95&RC и установки измерения УИП-005: Сб. докл. симпозиума XVII фестиваля "Dysnai-2004", Литва.
9. *Комплексная методика* определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000. РДЭО 1.1.2.09.0137-2009. - ОАО «Концерн Росэнергоатом».
10. *Китин Дж.Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1967. - 428 с.
11. *Уриг Р.* Статистические методы в физике ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1974. - 400 с.
12. *Feynman R.P.* Statistical Behavior of Neutron Chains. LA-591 (DEL). - Los Alamos Scientific Laboratory, 1946.
13. *Orndoff J.D.* Prompt Neutron Periods of Metal Critical Assemblies // Nucl. Sci. Eng. - 1957. - Vol. 2. - P. 450.
14. *Kuramoto R., Adimir dos Santos, Jeres R. et al.* Rossi- α Experiment in the IPEN/MB01 Research Reactor // Brazilian J. of Phys. - 2005. - Vol. 35, No. 3B.
15. *Czibok T., Dezso Z., Horvath Cs. et al.* A modernized

and versatile startup reactivity measuring system installed at NPP Paks and its application for subcritical systems // Nucl. Eng. and Design. - 2006. - Vol. 236. - P. 2356 - 2364.
16. Doulin V.A., Spriggs G.D. On the Rossi- α Meas-

urements of β_{eff} in Reflected Reactors // Atomnaja Energiya. - 1997. - Vol. 82, No. 2. - P. 66 - 68.
17. Hansen G.E. The Rossi- α Method. Workshop on Subcritical Reactivity Measurements. - University of New Mexico, August 25-29, 1985.

В. І. Борисенко¹, О. П. Волох², В. В. Горанчук¹, М. М. Сидорук^{1,2}

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПІДКРИТИЧНОСТІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Розглянуто питання визначення підкритичності ядерного реактора. Підкреслено, що незважаючи на вимоги нормативних документів з визначення підкритичності ВВЕР з початку їхньої експлуатації до теперішнього часу така задача не вирішена. Представлено результати визначення ступеня підкритичності реактора ВВЕР-М методом Россі- α . Розглянуто можливість визначення підкритичності ВВЕР, а також можливість визначення підкритичності методом Россі- α з роздільною здатністю за часом 100 мкс. Показані можливі причини похибки визначення підкритичності реактора.

Ключові слова: підкритичність, реактивність, статистичні методи, метод Россі- α , дослідницький реактор, енергетичний реактор.

V. I. Borysenko¹, O. P. Volokh², V. V. Goranchuk¹, M. M. Sydoruk^{1,2}

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

SUBCRITICALITY DETERMINATION OF NUCLEAR REACTOR

In this article the subcriticality determination of nuclear reactor is considered. Emphasized that, despite the requirements of regulatory documents on the subcriticality determination of VVER from the beginning of their operation, so far, this problem has not been solved. The results of subcriticality determination of Rossi- α method of the WWR-M is presented. The possibility of subcriticality determination of VVER is considered. The possibility of subcriticality determination of Rossi- α method with time resolution is of about 100 microseconds is also considered. The possible reasons for the error in subcriticality determination of the reactor are indicated.

Keywords: subcriticality, reactivity, statistical methods, Rossi- α method, research reactor, power nuclear reactor.

REFERENCES

1. Nuclear safety terms of nuclear power plants reactors with VVER pressurized by water. NP 306.2.145-2008. (Ukr)
2. Nuclear safety terms of nuclear power plants. PBYA RU AC-89. PNAE G-1-024-90. (Rus)
3. Nuclear safety terms of nuclear power plants. PBYA-04-74. - Gosatomnadzor, 1974. (Rus)
4. The program "On measures implementation on safety improving and modernization of power unit No. 2 of Khmel'nitsky NPP". - NAEK "Energoatom", 2004. (Rus)
5. IAEA Technical Report. IAEA-EBR-WWER-05 (March 1996). (Rus)
6. Calculation methods of neutron-physical characteristics on physical experiments at NPPs with VVER-1000 reactors. РДЭО 0151-2004. - ОАО "Kontsern Rosenergoatom", 2005. (Rus)
7. Ponomarenko G.L. New conceptual approach to minimum sufficient control rods in reactors determination. MNTK-2011. (Rus)
8. Kudryavtsev K.G., Kalyazin N.N., Bolotov D.V. et al. // Sb. dokl. simpoziuma XVII festivalya "Dysnai-2004", Litva. (Rus)
9. Integrated method of physical and dynamic characteristics of the RBMK-1000 determining. RDEO 1.1.2.09.0137-2009. - ОАО "Kontsern Rosenergoatom". (Rus)
10. Kipin Dzh.R. Physical basis of nuclear reactors kinetics. - Moskva: Atomizdat, 1967. - 428 p. (Rus)
11. Urig R. Statistical methods in nuclear reactors physics. - Moskva: Atomizdat, 1974. - 400 p. (Rus)
12. Feynman R.P. Statistical Behavior of Neutron Chains. LA-591 (DEL). - Los Alamos Scientific Laboratory, 1946.
13. Orndoff J.D. // Nucl. Sci. Eng. - 1957. - Vol. 2. - P. 450.
14. Kuramoto R., Adimir dos Santos, Jeres R. et al. // Brazilian J. of Phys. - 2005. - Vol. 35, No. 3B.
15. Czibok T., Dezso Z., Horvath Cs. et al. // Nucl. Eng. and Design. - 2006. - Vol. 236. - P. 2356 - 2364.
16. Doulin V.A., Spriggs G.D. // Atomnaja Energiya. - 1997. - Vol. 82, No. 2. - P. 66 - 68.
17. Hansen G.E. The Rossi- α Method. Workshop on Subcritical Reactivity Measurements. - University of New Mexico, August 25 - 29, 1985.

Надійшла 14.02.2014

Received 14.02.2014